

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СКЛОНОВЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ

Эрозионные процессы на склоновых агроландшафтах приводят к снижению плодородия почвы, существенному уменьшению урожайности выращиваемых культур, не соблюдению технологического процесса работы машинно-тракторного агрегата, разрушению дорог сельскохозяйственного назначения и др. Вопросам поверхностного задержания стока уделяется значительное внимание, поскольку решая их возможно активно управлять процессами стокообразования и эрозии почв на склоновых агроландшафтах. Различные подходы применяемые сегодня для оценки эрозионных процессов в большинстве случаев не соответствуют реальному процессу. Наблюдаемое несоответствие расчетных данных и экспериментов следует объяснять недостаточным учетом характеристик и параметров почвы. Эти параметры на склоновых агроландшафтах меняются существенно и гидравлика склонового стока имеет свои принципиальные особенности, по сравнению, например, с речными процессами. Предлагается применять для оценки эрозионных процессов, возникающих на склоновых агроландшафтах, математическую модель прогноза смыва почвы с сельскохозяйственных полей. Учитывая принципиальные особенности гидравлики склонового стока при проектировании противозэрозионных технологий, в математическую модель включены гидравлические потери водотока на преодоление сопротивлений подстилающей поверхности, эрозионные процессы и транспортирование наносов. Аprobация разработанной модели проводилась по данным полевых исследований выполненных на территории СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики. Результаты определения исследуемых гидрофизических параметров и прогноза количества смывтой почвы для конкретного участка представлены в виде карт с изолиниями. С целью изменения гидрофизических и эрозионных свойств почвы желателен применять перспективные способы посева сельскохозяйственных культур, например, сочетать предпосевную обработку почвы с посевом, таким образом уменьшить количество проездов машинно-тракторного агрегата по сельскохозяйственному полю и минимизируется взаимодействие рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой.

Ключевые слова: прогноз смыва почвы, водный поток, склоновые агроландшафты, уклоны гидравлических потерь, математическая модель.

Водная эрозия почвы склоновых агроландшафтов является наиболее распространенным и опасным видом их деградации. Эрозионные процессы приводят к снижению плодородия почвы, существенному уменьшению урожайности выращиваемых культур, изменяется структура почвенного покрова и не соблюдается технологический процесс работы машинно-тракторного агрегата вследствие снижения устойчивости хода сельскохозяйственных машин на склонах, расчлененных промоинами и оврагами, сокращения его производительности, увеличения износа рабочих органов и деталей машин, разрушаются дорожные полотна как с твердым покрытием, так и дороги сельскохозяйственного назначения [6], [1].

Вопросам поверхностного задержания стока уделялось значительное внимание, поскольку решая их, возможно, активно управлять процессами стокообразования и эрозии почв при внедрении и контроле противозэрозионных технологий на склоновых агроландшафтах [14]. В нашей стране и за рубежом разработано мно-

жество теорий русловых процессов [1], [2], [10], [12], [15], однако не все из них соответствуют реальному процессу. Наблюдаемое несоответствие расчетных данных и экспериментов следует объяснять недостаточным учетом характеристик и параметров почвы. Эти параметры на склоновых агроландшафтах меняются существенно и гидравлика склонового стока имеет свои принципиальные особенности, по сравнению, например с речными процессами.

При рассмотрении движения водного потока на склоне, можно выявить основные закономерности, связывающие параметры потока и подстилающей поверхности, обусловленные воздействием на него движущих сил и сил сопротивления движению [9]. Воздействие этих сил, которые обеспечивают ускорение или торможение водного потока с учетом его скорости можно представить в виде мощностного баланса

$$N_{\alpha} = N_{\psi} + N_{\phi} + N_{\delta} + N_{\gamma} + N_{j}, \quad (1)$$

где N_{α} – мощность водного потока, Дж/с; N_{ψ} – потери мощности водного потока на раз-

мыв подстилающей поверхности склона, Дж/с; N_ϕ – потери мощности водного потока на преодоление силы сопротивления шероховатости подстилающей поверхности склона, Дж/с; N_δ – потери мощности водного потока на преодоление силы сопротивления растительных элементов на поверхности склона, Дж/с; N_γ – потери мощности водного потока, обусловленные влиянием волнистости подстилающей поверхности склона, Дж/с; N_j – потери мощности водного потока, обусловленные влиянием инерции потока, Дж/с.

Для сравнения водных потоков, движущихся по разным подстилающим поверхностям склона и выявления резервов энергии водного потока, которые могут, например, ускорить поток или размывать микроусло, уравнение мощностного баланса водного потока (1) приведем к безразмерной форме разделив все его составляющие на произведение веса и скорости потока [8]

$$i = i_\phi + i_\psi + i_\delta + i_\gamma + i_j + i_s = i_c + i_\psi + i_j + i_s = \sum i_\lambda, \quad (2)$$

где i – уклон подстилающей поверхности; i_ϕ – уклон гидравлических потерь на трение; i_ψ – уклон гидравлических потерь на размыв подстилающей поверхности склона; i_δ – уклон гидравлических потерь на преодоление растительных элементов; i_γ – уклон гидравлических потерь на преодоление волнистости поверхности; i_j – уклон гидравлических потерь на преодоление инерции потока; i_s – уклон гидравлических потерь на взвешивание твердых частиц; i_c – уклон гидравлических потерь на преодоление стокоформирующей поверхности; $\sum i_\lambda$ – сумма уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности.

Полученная математическая модель (2) показывает баланс действительного уклона и суммы уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности.

Используя подходы, предложенные в работах [3], [4], [6]–[8], представим выражение (2) в развернутом виде

$$i = \frac{(1+\phi)}{2qg} \lambda_{zt} v^3 + \frac{1}{\psi} v^2 + \frac{v^3}{2\delta^2 qg} + \frac{\gamma}{2qg} v^3 + \frac{j}{g}, \quad (3)$$

где ϕ – коэффициент гидравлической шероховатости; λ_{zt} – коэффициент сопротивления гладкой поверхности; v – скорость движения элементарного объема водного потока, м/с;

$q = \frac{Q}{B}$ – единичный расход водного потока, м²/с; Q – расход водного потока, м³/с; B – ширина водного потока, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ψ – потенциал эрозионной стойкости, Дж/кг; γ – коэффициент гидродинамического сопротивления волнистости поверхность или дискретного препятствия; j – ускорение водного потока, м/с².

Для определения транспортирующей способности потока или секундной массы почвы переносимой потоком, используя выражение (3), получено уравнение [8]

$$R_s = \left(1 - \frac{i_\psi + i_c}{i}\right) \rho_w Q, \quad (4)$$

где ρ_w – плотность воды, кг/м³; Q – расход движущейся жидкости, м³/с.

Анализ уравнения (4) показывает, что при движении водного потока по подстилающей поверхности может существовать три режима его эрозионно-транспортирующей способности.

Проверка полученной формулы (4) проводилась по результатам прецизионных экспериментальных исследований проведенных группой ученых в лаборатории Нидерландского университета Вагенинген. Средняя величина аппроксимации данных по полученному уравнению (4) составила 0,984 [8].

Таким образом, на основании анализа уравнения движения, установлено, что основными составляющими сопротивлению водного потока являются следующие гидравлические потери на трение, преодоление растительных элементов, преодоление волнистости поверхности, а также необходимо учитывать в расчетах гидравлические потери на взвешивание твердых частиц и на размыв подстилающей поверхности склона. Воздействуя установленными факторами сопротивления на водный поток можно управлять стоком атмосферных осадков на подстилающей поверхности склонового агроландшафта.

Апробация разработанной модели (4) выполнялась по данным полевых исследований.

Экспериментальные исследования по определению гидрофизических и эрозионных характеристик почвы [5]: потенциала эрозионной стойкости, коэффициента гидравлической шероховатости, пористости и коэффициента фильтрации в полевых условиях проводились на территории площадью более 400 га с разными агрофонами в СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики при поддержке РФФИ по проекту 13-05-97048-р_поволжье_а. Схема расположения экспериментальных точек на поле с посевами озимой культуры приведена на рисунке 1. С помощью программы «Google Планета Земля» на схеме отражен исследуемый участок 40x40 м с координатами его месторасположения.

Для определения эрозионных характеристик почвы применялось приборное обеспечение, разработанное для использования в полевых условиях на склоновых сельскохозяйственных землях [11], [13].

Результаты полевых экспериментальных исследований по определению коэффициента гидравлической шероховатости и ПЭС на опытном поле СХПК «Труд» представлены на рисунке 2 (а, б) в виде карт с изолиниями. Пара-

метры эрозионных характеристик почвы измерялись 3 раза в одной точке. Изменение уклона стокоформирующей поверхности представлено на рисунке 2 (в). Карты изолиний величины смыва почвы для исследуемого участка рассчитаны с помощью уравнения (4) и представлены на рисунке 2 (з).

Большая трудоемкость операций по определению гидрофизических свойств почвы позволила получить только средние значения результатов обработки данных по пористости и коэффициенту фильтрации соответственно $0,457 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и $4,89 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ при плотности почвы $1,392 \text{ г/см}^3$.

Анализ результатов экспериментальных исследований (см. рисунок 2 а, б) показал, что величина ПЭС и коэффициент гидравлической шероховатости характеризуются пространственной изменчивостью в зависимости от показателей почвенного покрова в пределах однородного участка – выявляется при статистической обработке данных измерений.

Проводя анализ карты изолиний величины смыва почвы (см. рисунок 2 з) установлены эрозионноопасные области для исследуемого участка: точки 4-5 и 5-5, а также точки 4-2 и 4-3,



Рисунок 1. Планировочная схема расположения экспериментальных точек на сельскохозяйственном поле СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики

где смыв почвы может достигнуть 0,006 кг/с и более при заданной интенсивности стока.

Выводы

Используя полученные гидрофизические и эрозионные характеристики почвы в полевых условиях на территории более 400 га опытного полигона СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики с помощью разработанных методик и технических средств для их реализации, проведен расчет величины смыва по-

чвы, применяя полученную математическую модель. Представлены карты изолиний величины смыва почвы для исследуемого участка. Установлены эрозионноопасные области исследуемого участка, где смыв почвы может достигнуть 0,006 кг/с и более при заданной интенсивности стока.

С целью изменения гидрофизических и эрозионных свойств почвы желательно применять перспективные способы посева сельскохозяйственных культур, например, сочетать предпосев-

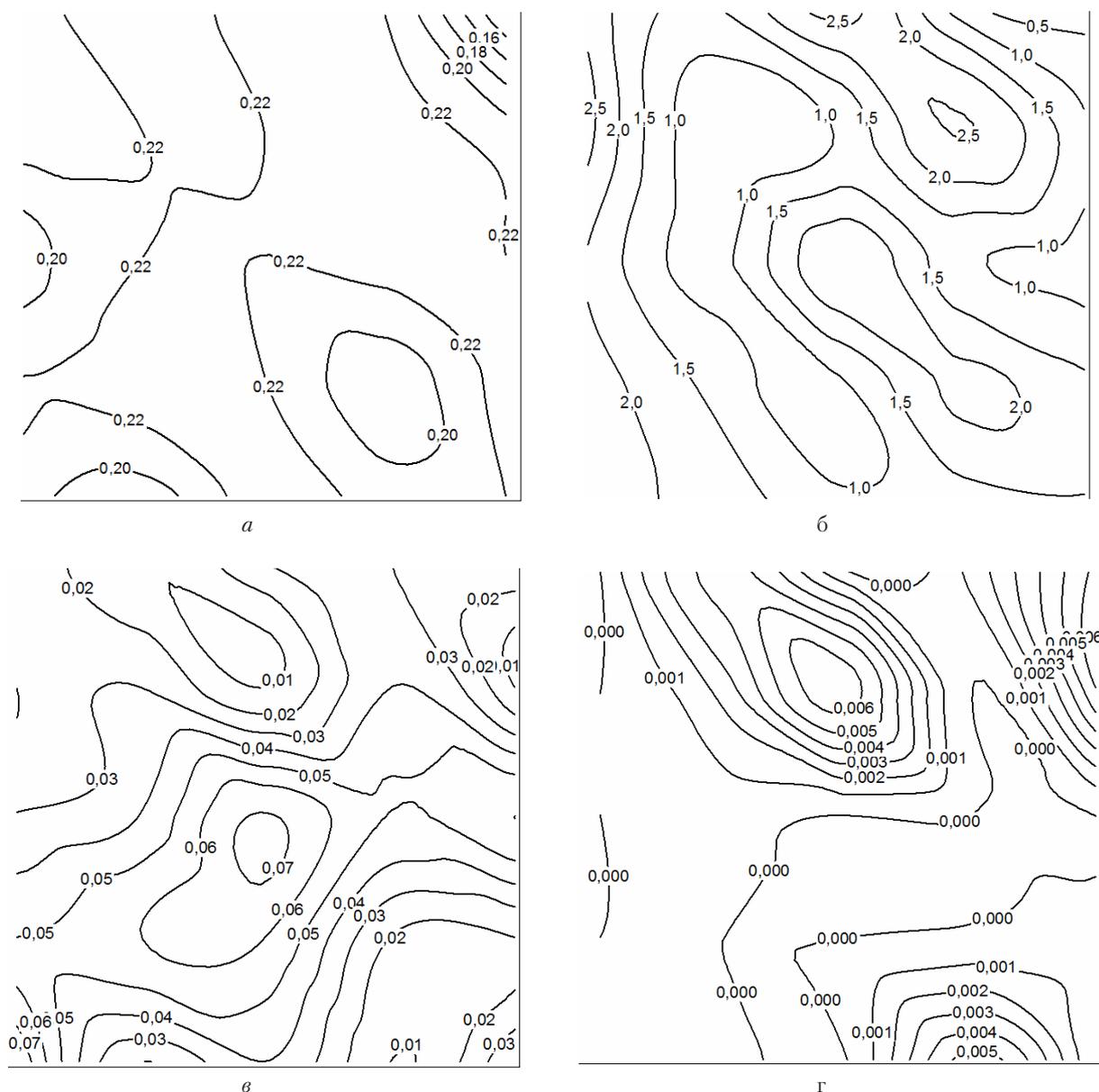


Рисунок 2 – Карты изолиний параметров контроля и величины смыва почвы для исследуемого участка:
 а – коэффициент гидравлической шероховатости; б – потенциал эрозионной стойкости, Дж/кг;
 в – уклон подстилающей поверхности; г – смыв почвы, кг/с.

ную обработку почвы с посевом, таким образом уменьшится количество проездов машинно-тракторного агрегата по сельскохозяйственному

полно и минимизируется взаимодействие рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой.

10.06.2015

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-05-97048-р_поволжье_a)

Список литературы:

1. Барышников, Н.Б. Формулы и методы для расчета расходов донных наносов / Н.Б. Барышников, Ю.А. Демидова, А.О. Пагин, А.Б. Соколов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №11. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 168 с.
2. Боровков, В.С. Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В.С. Боровков. – Л.: Гидрометеоздат. – 1989. – 285 с.
3. Васильев, С.А. Безразмерный показатель для оценки гидравлических потерь на трение в руслах разной шероховатости / С.А. Васильев, И.И. Максимов, В.И. Максимов // Теоретический и научно-практический журнал «Мелиорация и водное хозяйство». Выпуск №5, 2011. – С. 40-42.
4. Васильев, С.А. Определение эквивалентной шероховатости стокоформирующей поверхности для оценки противоэрозионных мероприятий на склоновых землях / С.А. Васильев, И.И. Максимов, В.В. Алексеев // Теоретический и научно-практический журнал «Мелиорация и водное хозяйство». Выпуск №4, 2014. – С. 31-34.
5. Васильев, С.А. Результаты экспериментальных исследований гидрофизических и эрозионных свойств почв на территории СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики / С.А. Васильев, И.И. Максимов, Е.П. Алексеев [и др.] // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. – 2013. – Вып. 4(80), Ч.2. – С. 39 – 45.
6. Васильев, С.А. Совершенствование методики и технических средств оценки для проектирования противоэрозионных технологий на склоновых землях: Дисс. ... к.т.н. – Чебоксары, 2006. – 161 с.
7. Васильев, С.А. Теоретические предпосылки аналитического определения смоченного периметра стокоформирующей поверхности / С.А. Васильев, А.Ю. Пагунов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. Серия «Естественные и технические науки», № 4(76), 2012. – С. 47-50.
8. Васильев, С.А. Энергетический подход к оценке эрозионно-транспортирующей способности водного потока на склоновом агроландшафте / С.А. Васильев, И.И. Максимов, В.В. Алексеев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. Электронное периодическое издание, № 3 (19), 2015. – С. 79-93
9. Великанов, М.А. Динамика русловых потоков: в 2 т. / М.А. Великанов – М.: Гостехиздат, 1954-1955. – т.1-2. – 323 с.
10. Ларионов, Г.А. Влияние наносов на эродирующую способность мелководных потоков / Г.А. Ларионов, Н.Г. Добровольская, З.П. Кирюхина, Л.Ф. Литвин // Эрозия почв и русловые процессы. – М., 2003. Вып. 14. -С. 34-45.
11. Максимов, И.И. Прогноз эрозионных процессов, техника и технология для обработки склоновых земель: дисс. докт. техн. наук./ И.И. Максимов – Чебоксары, 1996. – 325 с.
12. Мирцхулава, Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел / Ц.Е. Мирцхулава.- Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 303 с.
13. Патент №2345323 РФ. Способ определения коэффициента гидравлической шероховатости в полевых условиях и устройство для его осуществления / И.И. Максимов, С.А. Васильев, В.И. Максимов, А.А. Васильев – Оpubл. 27.01.2009, Бюл. № 3.
14. Швецб, Г.И. Теоретические основы эрозиоведения / Г.И. Швецб. – Киев; Одесса: Вища школа, 1981. – 219 с.
15. Ali, M., Sterk, G., Seeger, M., Boersema, M., and Peters, P.: Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 591–601, 2012.

Сведения об авторе:

Васильев Сергей Анатольевич, доцент кафедры транспортно-технологических машин и комплексов Чувашской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук

428003, Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, тел. (8352)620226, e-mail: vsa_21@mail.ru